

경제적인 저압 동력계통 전압방식에 관한 연구

장중구 · 서상진 · 이민용
상진기술엔지니어링(주)

Study on the Selection of Voltages for
Economic Low Voltage Power Distribution System

Choong-Koo Chang · Sang-Jin Suh · Min-Young Lee
Sangjin Engineering Company, Ltd

Abstract - The selection of voltage is one of the most significant factors in the design of power system for industrial plant. It is a major factor in determining over-all system cost, flexibility, and ease of future expansion. This paper presents the study results on the selection of economic voltage for low voltage power distribution system.

1. 서 론

저압 동력설비를 사용하는 국내 수용가 혹은 산업플랜트에서는 주로 380V 전압을 채택하고 있다. 이는 전기사업법에서 저압의 경우 표준 공급전압을 110V, 220V 및 380V로 정하여 놓고 있으며, 3상 4선 방식에 의하여 동일 변압기를 이용 220V와 380V를 함께 공급할 수 있다는 장점이 있기 때문인 것으로 사료된다.

그러나 한국산업규격(KS C 4202)에서는 저압 3상 유도전동기의 정격전압을 380V와 440V 두 가지로 구분하고 있으며, 동력설비를 사용하는 수용가 특히 산업플랜트의 경우 설비용량의 증가와 상호간섭 방지 등의 이유로 동력용 변압기와 조명 및 전열용 변압기를 구분하여 별도로 설치하는 사례가 증가하고 있다는 점을 감안하면 굳이 저압전동기 정격전압을 380V로 한정지어 사용하는 것은 재고할 필요가 있다.

저압 전동기 정격전압을 440V로 할 경우, 전압을 높인 만큼 적은 전류가 흘러도 되므로 케이블의 사이즈를 줄일 수 있을 뿐만 아니라, 배전반 모선 및 케이블의 단락용량이 줄어들고 차단기의 차단용량 또한 줄일 수 있으므로 전원설비의 시설비를 크게 경감시킬 수 있다. 실제로 미국의 경우 저압 동력계통 전압으로 480V를 사용하고 있으며, EU 국가들은 400V 전압을 채택하고 있다. 국내에서도 발전소와 화학플랜트 단지 등에서는 주로 480V 또는 460V 전압(공칭)을 저압 동력전압으로 채택하고 있고 여기에 맞춰서 460V 혹은 440V 정격의 전동기를 사용하고 있다. 따라서, 일반 산업플랜트 및 100kW 이상 동력 수용가에서 380V 이외에 440V 정격 전동기의 사용을 적극 검토해 볼 필요가 있다.

본 논문에서는 각각 380V와 460V 저압 동력전원 전압방식의 경제성을 비롯한 효율성의 이론적 검토와 함께 실제 사례를 연구 분석하여 경제적인 전압방식에 대한 실증적 근거를 제시코자 한다.

2. 전압 선정시 고려사항

2.1 법규 및 규격

2.1.1 전기사업자의 공급전압

수용가가 전기사업자로부터 공급받을 수 있는 전압 및 주파수의 종류는 전기사업법 16조에 따라 제정된 한전 전기공급약관 제23조(표 1)에 규정되어 있다. 계약전력 100kW 미만의 수용가는 단상 220V 혹은 3상 380V의 전압으로만 수전 받을 수 있기 때문에 전압방식에 대한 선택의 여지는 없다고 볼 수 있다. 그러나 계약전력 100kW를 초과하는 수용가는 22.9kV 이상 특고압으로 수전을 하게 되므로 저압 동력부하를 위해서는 강압 변압기를 사용하게 된다. 이때 중요한 것이 저압 전압방식을 선정하는 것이다. 지금까지는 별 비판의 없이 380V 전압을 저압동력에 사용하고 있으나, 설비용량의 증가 및 에너지 비용의 증가로 인하여 설비투자비용과 운전비용을 고려한 경제적인 전압방식을 선택할 필요성이 점차 대두되고 있다.

표 1 전기공급방식 및 공급전압(전기공급 약관 23조)

계약전력	공급방식 및 공급전압	유지범위
100kW미만	교류 단상 220V 또는 교류 삼상 380V중 한전이 적당하다고 결정한 한가지 공급방식 및 공급전압	220V±13V 380V±38V
100kW 이상	교류 삼상 22,900V	
10,000kW 이하	교류 삼상 154,000V	
300,000kW 이하	교류 삼상 345,000V 이상	

2.1.2 전동기 제작규격

한국 산업규격(KS C4202)에 따르면 저압전동기의 표준 정격전압을 단상 220V, 3상 380V 및 3상 440V로 정하고 있으며, 국내 전동기 제작회사들도 대부분 여기에 맞춰서 전동기를 생산하고 있다.

2.2 전동기 부하 용량의 크기와 적정 전압

전동기의 기동토크와 전압과의 관계식은 다음과 같다.

$$T = kVI = kV \frac{V}{Z} = k \frac{V^2}{Z} (Kg.m) \quad (1)$$

여기서, k는 전동기 토크상수이고 Z는 전동기 임피던스이다. 따라서 전동기가 필요로 하는 토크와 전동기 코일

의 임피던스를 고려하여 전동기의 전압을 선정하게 되며 현재 사용되고 있는 전동기의 출력과 전압과의 관계는 다음 표 2와 같다.

표 2 전동기 출력과 전압과의 관계

전압 구분	전동기출력(kW)	
	제작 가능한 범위	경제적인 범위
200V 급	0.2 ~ 100	0.2 ~ 30
400V 급	0.3 ~ 500	5.0 ~ 200
3kV 급	80 ~ 1,000	200 ~ 1,000
6kV 급	200 ~ 1,000	500 ~ 1,000

저압 전동기의 표준 정격전압이 380V와 440V 2종이므로 400V급 전동기라 함은 현실적으로 3상 380V와 3상 440V 전동기를 칭한다고 할 수 있다. 다만, 미국 기술 기준에 따라 건설된 국내 발전소들에서는 460V 정격의 전동기를 사용하고 있다.

2.3 절연 및 안전성 문제

600V 이하 저압 기기에 대하여는 동일한 절연 등급이 적용되므로 절연과 관련한 경제성 문제는 저압 동력계통의 전압방식 선정시 고려대상에서 제외된다.

전압과 안전성과의 관계는 가정용 기계 혹은 휴대용 공구 등에서 중요시 여겨진다. NEC는 안전상의 이유로 일부 조명회로와 가전기기의 사용전압을 150V(대지 전압) 이하로 제한하고 있다. 그러나, 120V를 초과하는 경우 안전측면에서 전압방식 선정시 고려해야 할 주요사항에 대한 확실한 근거는 없다. 전압이 높으면 높을수록 감전되기가 쉽다고 생각할 수도 있겠지만, 50V를 넘는 전압에서는 도전체(導體)와 접촉할 경우 감전사고를 일으킬 수 있으므로 반드시 전원을 차단시킨 후 도전(導電)부위에 대한 작업을 하여야 한다.[3]

3. 저압 동력계통 전압방식의 경제성 비교

3.1 공칭전압과 전동기 정격전압과의 관계

경제성을 비교하기에 앞서서 저압 동력계통 공칭전압과 전동기 정격전압에 대한 이해가 필요하다. NEMA MG-1 1978에 따르면, 시스템 공칭전압과 전동기 정격전압과의 관계는 표 3과 같다.

표 3 저압계통 공칭전압과 전동기 정격전압[4]

단상 전동기		삼상 전동기	
공칭전압[V]	정격전압[V]	공칭전압[V]	정격전압[V]
120	115	480	460
240	230	600	575

전동기 정격전압을 공칭전압과 다르게 규정한 이유는 실제 전동기 단말의 전압이 공칭전압보다 낮을 수밖에 없기 때문에 전동기의 성능을 보증하기 위해서이다.

배전선로 설계시, 전기사업자의 공급전압 변동폭(표 1)과 배전선로에서의 전압강하 5~7%[5]를 고려하여 전동기 단말에서의 전압이 공칭전압의 90% 이상 유지되도록 설계하는 것이 통상적이다. 따라서 전동기 정격전압을 전압강하 하한 폭의 중간 즉 공칭전압의 95%에 설정하고 이때 전동기의 효율이 최대가 되는 것이다.

이와 같은 논리에 따라라면 380V 계통의 경우에는 전동기 정격전압을 360V 하는 것이 타당하다. 그리고 전동기 정격전압이 440V 인 경우에는 저압 동력계통 전압을

460V로 설계할 필요가 있다.

전압 변동이 유도전동기의 특성에 미치는 영향은 표 4와 같다.

표 4 전압변동에 따른 유도전동기 특성 변화[4]

특성	비례 변수	전동기 단말 전압	
		정격 x 90%	정격 x 110%
기동 토크	V^2	-19%	+21%
슬립(s)	$(1/V)^2$	+23%	-19%
전부하 속도	동기속도- s	-0.2 ~ 1.0%	+0.2 ~ +1.0%
기동전류	V	-10%	+10%
전부하 전류	*	+5 ~ +10%	-5 ~ -10%
무부하 전류	*	-10 ~ -30%	+10 ~ +30%
온도상승	*	+10 ~ +15%	-10 ~ -15%
전부하 효율	*	-1 ~ -3%	+1 ~ +3%
전부하 역율	*	+3 ~ +7%	-2 ~ -7%
소음	*	약간 감소	약간 증가

3.2 380V와 440V 정격 전동기의 배전효율 비교

용량이 동일한 3상 380V 정격 유도전동기와 440V 전동기의 부하전류와 동일 임피던스의 선로로 배전하는 경우의 선로손실은 각각 다음 식으로부터 구하여 진다.

$$\text{부하전류, } I = \frac{kVA}{\sqrt{3} \times V} \quad (2)$$

$$\text{선로손실} \propto I^2 = \frac{kVA^2}{3 \times V^2} \quad (3)$$

여기서 kVA 는 전동기 용량을 나타낸다.

따라서, 440V 정격 전동기의 부하전류와 선로손실은 각각 380V 대비 86.4%와 74.6%가 된다. 즉 단위 용량(kVA) 당 선로전류가 13.6% 감소하므로 동일규격의 전선을 사용하는 경우에는 선로손실이 25.4% 감소하게 되어 전력요금을 절감할 수 있고, 손실을 고려하지 않고 배전선로상의 허용 전압강하만을 고려한다면 단면적이 작은 전선(7% 전압강하기준 40%)을 사용할 수 있으므로 전선비용이 대폭 감소된다. 그리고 가격에 중요한 영향을 미치는 배전반 모선과 차단기의 단락용량 역시 다음 식 (4)에서와 같이 전압에 반비례하므로 380V 대비 13.6% 감소하게 된다.(표 5 참조)

$$\text{단락전류, } I_{sc} = \frac{kVA \times 10^5}{\sqrt{3} \times \%Z \times V} [A] \quad (4)$$

이상과 같은 결과를 놓고 볼 때에 전열 및 조명용 전원과 변압기를 공유하는 부득이한 경우를 제외하고는 저압 동력계통에 460V 방식을 채택하고 440V 정격 전동기를 사용하는 것이 훨씬 경제적이라고 할 수 있다. 실제로 전압방식에 따른 배전설비 설치비용을 분석한 자료(그림 1)가 이를 뒷받침해 주고 있다.

3.3 380V와 460V 배전방식의 전압강하 영향 비교

380V 방식에서는 배전선로에서의 전압강하가 7%인 경우 전동기 단자전압이 353.4V 즉 정격전압(380V)의 93%가 되나, 460V 방식에서는 7% 전압강하시 427.8V가 되어 전동기 정격전압(440V)의 97.2%가 되는 만큼 전압강하로 인한 부하전류 증가율이 적어서 배전선로에서의 손실이 적고 전동기 효율저하 역시 적다.

표 5 전동기 정격에 따른 부하전류 및 손실 비교

	440V 정격	380V 정격
부하전류(%)	86.4	100
선로손실(%)	74.6	100
단락전류(%)	86.4	100
전압강하여유	20V(4.5%)	0V

[주] 전동기 용량과 케이블 임피던스가 동일한 경우

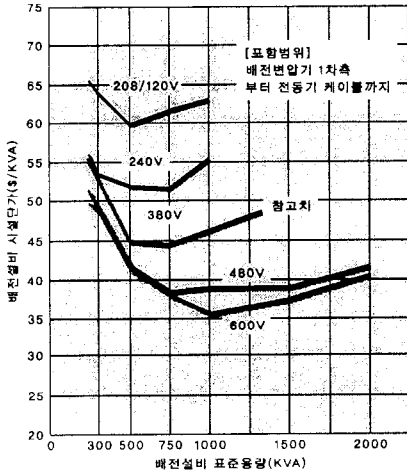


그림 1 전압방식에 따른 단위용량 당 배전설비비[3]

4. 장대(長大기)터널 동력설비 전압방식 선정사례

4.1 장대(長大기)터널의 수변전설비 구성

그림 2는 장성-담양간 고속도로 구간에서 시공 예정인 장성터널 수변전설비 계통도이다. 한국전력공사 변전소로부터 3상 22.9kV를 수전하여 각각 동력용 변압기와 조명용 변압기를 써서 동력계통은 460V 그리고 조명용은 380/220V 전압으로 배전하는 방식이다.[6]

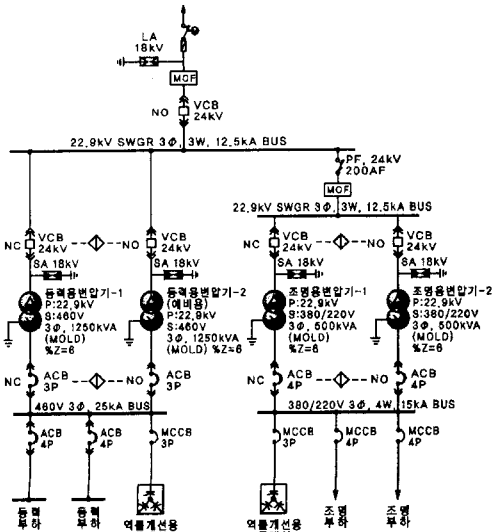


그림 2 장대(長大기)터널 수변전설비 계통도 예

장성 터널은 총연장 3,598m, 편도 2차선 장대터널로서 배전거리를 고려하여 시점부와 종점부에 각각 주, 부변전소 두었으며, 터널내 환기를 위한 제트팬 부하 1702kW(37kWx46대)를 주변전소(814kW)와 부변전소(888kW)에서 분담하고 있다. 그림 2는 주변전소의 수변전설비 계통도이고, 부변전소도 이와 동일방식이다.

동력용과 조명용 변압기는 예비용을 포함하여 2대씩 설치하였으며, 모자 계량방식을 채택 조명용 부하는 도로 조명 요구를 적용 받도록 하였다.

4.2 전압방식에 따른 케이블 설치비용 비교

배전변압기 2차측으로부터 전동기 단자까지의 배전선로 상 허용 전압강하를 7%로 규정하고 총 46개의 제트팬을 위한 케이블 사이즈를 산정하여 집계한 결과 표 6과 같다. 이 가운데 규격이 가장 긴 케이블은 1,314m 이고 케이블 사이즈는 1/C 150 mm² 이다.

반면에, 저압동력 전압을 380V로 하였을 경우를 가정하여 케이블 사이즈를 산정하여본 결과 최대 규격 케이블의 규격은 1/C 200 mm²가 되었으며 사이즈별 케이블 길이는 표 6과 같다.

표 6 장성터널 동력용 케이블 규격 및 길이비교

케이블 규격	총 소요길이(m)	
	460V 전압방식	380V 전압방식
3/C 38 mm ²	3,683	1,220
3/C 60 mm ²	8,536	4,446
1/C 100 mm ²	43,538	24,024
1/C 150 mm ²	22,158	39,048
1/C 200 mm ²	-	22,158
합계	77,880	90,896

그리고 케이블의 총 길이는 표 5에 나타난 바와 같이 16.7% 증가한다. 배전반에서 부하까지의 거리가 동일함에도 전선의 총 길이가 늘어나는 것은 전선이 굵어짐에 따라 삼심(3/C) 케이블 대신 단심(1/C) 케이블을 쓰게 되는 경우가 발생하기 때문이다. 케이블 가격적인 측면에서는 현재사가 기준으로 460V방식 대비 380V방식이 약 141% 정도의 비용이 소요되는 것으로 조사되었다. (426백만원 VS 600백만원)

4.3 전압방식에 따른 유지관리 비용 비교

케이블 설치비용 이외에 유지관리 비용 측면에서 보면, 3.3 절에서 설명한 바와 같이 460V 방식의 경우, 배전선로 전압강하 7% 적용시 단자전압이 427.8V이므로 정격 전압 440V의 97.2% 전압이 유지된다. 반면에 380V 방식을 채택하게 되면 같은 전압강하율에서 전동기 단자전압이 353.4V가 되어 정격전압 380V의 93%가 되고, 이때의 부하전류 및 선로 손실은 아래와 같다.

배전선로 전압강하 7% 적용시 전동기 부하전류 :

$$\begin{aligned}
 I_4 &= 440V \text{ 정격 전동기 부하전류} \\
 &97.2\% \text{ 단자전압에서의 전류} \approx 1.028 I_4 \\
 I_3 &= 380V \text{ 정격 전동기 부하전류} \\
 &93\% \text{ 단자전압에서의 전류} \approx 1.07 I_3
 \end{aligned}$$

$$\text{손실비(比), } \left(\frac{I_3}{I_4} \right)^2 = \left(\frac{1.07}{1.028} \right)^2 = 1.083 \quad (5)$$

따라서, 380V 전압방식에서 8.3%의 선로손실이 더 발

생한다.

4.4 전압방식에 따른 기동특성 및 영향

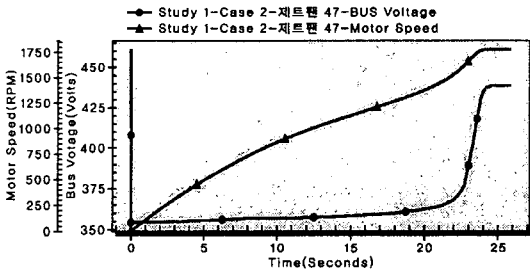
전동기 기동시에는 전부하전류의 약 5~7배에 이르는 전류가 흐르기 때문에 자연스럽게 배전선로에서의 전압강하가 증가한다.

그림 3과 4는 장성터널 환기팬 부하가운데 케이블 길이가 가장 긴 환기팬을 440V 정격 전동기 기동시와 380V 전동기 기동시로 나누어 시뮬레이션 한 결과이다. (Power tools, Ver.3.8, SKM)

모터용량 : 37kW, NEMA B Type

부하거리: 1,314m, 케이블규격: 1/C 150mm² x 3

공칭전압 : 460V, 전동기 정격전압 : 440V



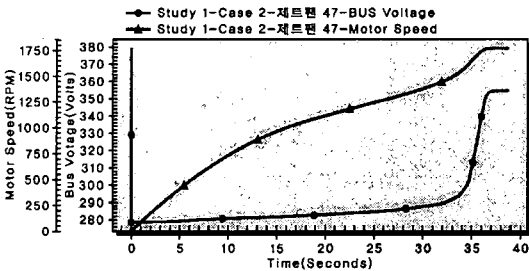
[주] 직입기동시 전동기 최저 단자전압은 354V(정격전압의 80.5%에 해당), 기동시간 24초.

그림 3 440V 전동기 기동시시뮬레이션 그래프

모터용량 : 37kW, NEMA B Type

부하거리: 1,314m, 케이블규격: 1/C 200mm² x 3

공칭전압 : 380V, 전동기 정격전압 : 380V



[주] 직입기동시 전동기 최저 단자전압은 278V(정격전압의 73.2%에 해당), 기동시간 37초.

그림 4 380V 전동기 기동시시뮬레이션 그래프

상기 시뮬레이션 결과를 통해서 알 수 있는 것은 380V 전동기의 경우 과도한 전압강하(NEMA Type B 전동기의 경우 정격전압의 80% 이상 되어야 정상적인 기동이 가능함)로 인하여 기동시간이 지연된다는 것이다. 이는 결과적으로 전동기 과부하로 이어져 전동기의 성능저하와 및 수명단축을 초래하게 되고 이를 막기 위해서는 별도의 기동장치, 예를 들면 소프트 스타터(Soft Starter)의 설치를 필요로 하게 된다.

5. 결론

이상의 저압 동력계통 전압방식 선정에 관한 연구검토 및 사례분석 결과는 다음과 같다.

우리나라에서 택할 수 있는 저압동력계통 전압방식은 380V와 460V 2 가지이고, 22.9kV 또는 그이상의 초고압으로 수전을 받는 100kW 이상의 전력수용가에서는 460V 전압방식을 택하는 것이 배전설비 시설비, 유지관리비 측면에서 경제적인 것으로 나타났다. 특히, 사례분석에서도 나타났듯이 배전선로가 긴 장대 터널과 같은 수용가에서는 460V 전압방식 채택시 경제적인 효과가 매우 크다. 다만, 동력용 변압기와 조명용 변압기를 공용으로 하고있는 소전력 수용가에 한해서는 예외라고 할 수 있겠다.

기술적인 측면 이외에 440V 정격 전동기의 구입의 용이성과 가격 등도 440V 정격 전동기를 사용함에 있어 고려될 사항이라고 할 수 있으나, 시장조사 결과 그와 같은 점에서는 380V 정격 전동기와 조건이 다를 바 없는 것으로 나타났다. [끝]

(참 고 문 헌)

- [1] 「한국전력공사 전기공급 약관 제23조」, <http://www.kepco.co.kr:8000/db1/owa/cmain5?flag=a>
- [2] ELEINFO. 전동기 전압별 경제적인 출력범위, <http://www.ele119.co.kr/1000/fr1260.htm>
- [3] Donald Beeman, "Industrial Power Systems Handbook", McGraw-hill Book Company, Inc., First Edition, New York, pp. 574~579, 1955
- [4] "IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants", IEEE Standard Board, pp.82~83, Dec. 2, 1993
- [5] 대한전기협회, 「내선규정」 제120-1절
- [6] 한국도로공사, 「고창-담양간 고속도로 장성-담양간 건설공구 설계보고서(전기)」, 2001.10